

Nd:YVO₄晶体 π 和 σ 偏振激光的实现及性能研究

俞叶, 段延敏, 郭俊宏, 张栋, 陈思梦, 廖小青, 朱海永*

温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江温州 325035

摘要 利用偏振分束器(PBS)选择性地实现 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体 π 和 σ 偏振的激光输出的实验研究。四方晶系 Nd:YVO₄ 晶体偏振荧光光谱的差异, 导致了输出 π 和 σ 偏振激光的性能差别。实验中利用 PBS 的反射光束主动选偏, 结合激光晶体沿通光方向旋转, 分别对 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体的 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 和 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁的偏振激光性能进行测试。在 11 W 的入射抽运功率下, 基于 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 能级跃迁分别获得了 5.5 W 的 π 偏振 1064.3 nm 激光输出和 4.4 W 的 σ 偏振 1066.7 nm 激光输出; 基于 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁分别获得了 2.9 W 的 π 偏振激光输出和 1.6 W 的 σ 偏振激光输出, 但波长均为 1341.8 nm。实验结果表明: a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体的 π 偏振激光输出有更高的转换效率, 而 σ 偏振激光输出则有更长的激光谱线。

关键词 激光器; 偏振选择器件; Nd:YVO₄ 晶体; 偏振分束器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0701007

Realization and Performance Study of π - and σ -Polarization Laser of Nd:YVO₄ Crystal

Yu Ye, Duan Yanmin, Guo Junhong, Zhang Dong, Chen Simeng,
Liao Xiaoqing, Zhu Haiyong

College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

Abstract π - and σ -polarization laser emission in a-cut Nd:YVO₄ crystal are selectively realized with a polarization beam splitter (PBS). The difference of polarized fluorescence spectra of tetragonal Nd:YVO₄ crystal results in the performance difference between the π - and σ -polarization laser outputs. The π - and σ -polarization laser performances of a-cut Nd:YVO₄ crystal with ${}^4F_{3/2}$ to ${}^4I_{11/2}$ and ${}^4F_{3/2}$ to ${}^4I_{13/2}$ energy level transitions are investigated by rotating the laser crystal along the optical direction and active polarization selection of PBS reflected beam. When the pump power is 11 W, π -polarization laser at 1064.3 nm with output power of 5.5 W and σ -polarization laser at 1066.7 nm with output power of 4.4 W are obtained for the ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ energy level transition, respectively. While for the ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ energy level transition, π -polarization laser at 1341.8 nm with output power of 2.9 W and σ -polarization laser at 1341.8 nm with output power of 1.6 W are obtained, respectively. The experimental results show that the π -polarization laser has higher conversion efficiency and the σ -polarization laser owns longer laser spectrum for a-cut Nd:YVO₄ crystal.

Key words lasers; polarization-selective devices; Nd:YVO₄ crystal; polarization beam splitter

OCIS codes 140.3580; 230.5440; 140.3530

收稿日期: 2017-02-28; 收到修改稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61505147)、浙江省公益技术应用研究(2015C35017, 2017C34008)、浙江省教育厅科研项目(Y201635542)、国家级大学生创新创业训练计划项目(201710351018)

作者简介: 俞叶(1996—), 女, 本科, 主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: 1229956882@qq.com

* 通信联系人。E-mail: hyzhu.opt@gmail.com

1 引 言

掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)晶体已被广泛用作中小功率半导体抽运激光器的激活介质^[1-3]。其基质 YVO₄ 晶体属于四方晶系晶体,存在较强的自然双折射现象,掺钕离子后具有很强的偏振吸收和辐射特性,以致激光输出呈线性偏振^[4-5]。Nd:YVO₄晶体平行于光轴的跃迁截面($\sigma_{\parallel} = 2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$)明显大于垂直于光轴的跃迁截面($\sigma_{\perp} = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)^[6]。于浩海等^[7]对掺钕钒酸盐晶体及其激光性能进行了综述。目前对各类掺钕钒酸盐晶体不同能级跃迁实现 0.9、1.0、1.3 μm 波段的激光研究已经较为成熟,但相关激光都以增益较强的 π 偏振为主。

各向异性激光晶体的偏振光谱存在着明显的差异,比如 Nd:YVO₄晶体的 π 偏振荧光光谱的最强峰在 1064 nm 附近,而 σ 偏振荧光光谱的最强峰在 1066 nm 附近^[8]。若能有效利用激光晶体偏振光谱的特性差异,选择实现特定偏振的激光输出,对丰富晶体激光波长和实现激光的特殊应用具有重要意义。吴波等^[9]和吕彦飞等^[10]分别利用偏振分束器(PBS)分光,将 Nd:GdVO₄晶体和 Nd:LuVO₄晶体的 π 和 σ 偏振激光在独立的腔内振荡,实现了 1.0 μm 波段双波长激光的同时输出。欧阳小军等^[11]利用在激光腔内插入偏振片强制弱增益偏振激光起振,实现了 Nd:YAP 晶体的 1339 nm 波长激光输出。但在腔内插入偏振片损耗比较大,且对入射角度非常敏感。本课题组利用 PBS 的 s 偏振分量主动选择 Nd:LuYVO₄混晶的特定偏振激光进行振荡,实现了 π 偏振单波长激光和 σ 偏振双波长激光输出^[12]。本文考虑 Nd:YVO₄晶体 π 和 σ 偏振荧光峰波长的差异,通过 PBS 选择不同偏振激光进行振荡,分别对 Nd:YVO₄晶体的⁴F_{3/2} ~ ⁴I_{11/2} 和 ⁴F_{3/2} ~ ⁴I_{13/2} 能级跃迁的偏振激光性能进行了研究。

2 激光偏振选择实验装置设计

为了选择性地实现 Nd:YVO₄晶体 π 偏振或 σ 偏振的激光输出,采用镀对应波长激光增透膜的 PBS 来选择对应偏振激光进行振荡。PBS 通过电介质分束膜反射 s 偏振分量,但允许 p 分量通过,以分离 s 偏振分量和 p 偏振分量,如图 1 所示。PBS 作为偏振器件使用时主要利用其透射光束,因为透射光束的消光比 $T_p:T_s$ 大于 1000:1,而反射光束的消光比为 20:1~100:1。但反射光束的反射率达 99%,明显高于约为 95%的透射光束的透射率。因此,在设计激光偏振选择实验系统时,可利用其反射光束,减少激光振荡的腔内损耗。Nd:YVO₄晶体的 π 和 σ 偏振激光振荡通过旋转激光晶体,以使其偏振方向(π 或 σ 偏振)与 PBS 的 s 偏振分量方向一致。

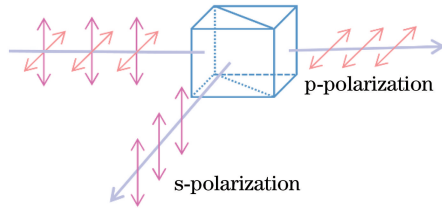


图 1 PBS 偏振分光特性

Fig. 1 Polarization separating characteristics of PBS

实验采用半导体激光端面抽运系统,装置示意图如图 2 所示。所使用的激光晶体为通光方向沿晶轴 a 轴切割,尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,掺钕离子分数为 0.3%的 Nd:YVO₄晶体。两通光面抛光后镀对抽运光 808 nm(反射率 $R < 0.2\%$)、1.06 μm 和 1.34 μm (反射率 $R < 0.2\%$)的增透膜。晶体用铝箔包裹后置于循环水冷铜块内,其表面温度控制在 20 °C 左右。抽运源为光纤耦合的 808 nm 半导体激光器(LD),其光纤的数值孔径为 0.22,芯径为 200 μm 。抽运光经一对消色差透镜组成的耦合透镜组准直聚焦成一个束腰直径约 320 μm 的光斑,入射到 Nd:YVO₄晶体中。激光谐振腔由 PBS 和两个腔镜(输入镜 IM 和耦合输出镜 OC)组成光路长约为 30 mm 的紧凑型腔。IM 镀对抽运光波长 808 nm 高透射(透射率 $T > 95\%$),对振荡激光波长(1.06 μm 或 1.34 μm)高反射的膜系;OC 作为耦合输出镜片,镀对振荡激光波长(1.06 μm 或 1.34 μm)部分反射的膜系。实验中分别准备了针对 1.06 μm 和 1.34 μm 激光的腔镜和 PBS,实现不同波段的激光输出只需替换两个腔镜和 PBS。

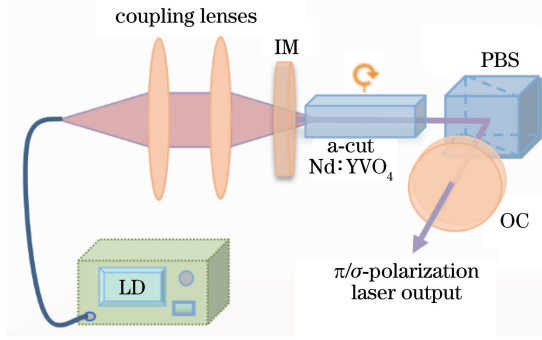


图 2 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体 π 和 σ 偏振激光实验装置

Fig. 2 Experimental setup of end-pumped Nd:YVO₄ crystal for π - and σ -polarization laser output

3 Nd:YVO₄ 晶体 π 和 σ 偏振激光实验结果

3.1 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 能级跃迁的激光偏振选择

首先研究 Nd:YVO₄ 晶体 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 跃迁对应 1.06 μm 波段的 π 和 σ 偏振激光输出特性。采用镀对 1000~1200 nm 增透的 PBS 和对 1.06 μm 激光透射率分别为 10% 和 30% 的两个耦合输出镜片开展实验。测量的 1.06 μm 波段 π 和 σ 偏振激光输出功率与入射抽运功率的关系如图 3 所示。由图 3 可知,输出功率随着入射抽运功率的增加而增加。使用 30% 透射率的耦合输出镜时, π 偏振激光器具有较高的斜率效率, 在所使用的最高抽运功率下获得比采用 10% 透射率耦合输出镜更高的输出功率。与 π 偏振激光相比, σ 偏振激光由于跃迁截面较小, 故阈值较高, 输出功率较低。对于 σ 偏振激光, 使用 10% 透射率的耦合输出镜即可实现较高的输出功率。在 11 W 的入射抽运功率下, ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 能级跃迁在 1.06 μm 波段分别获得了输出功率 5.5 W、斜率效率 55.8% 的 π 偏振激光和输出功率 4.4 W、斜率效率 45.1% 的 σ 偏振激光输出。

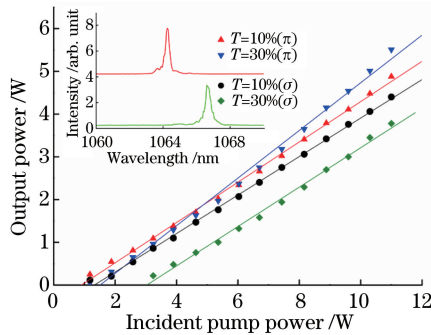


图 3 1.06 μm 波段 π 和 σ 偏振激光输出功率与入射抽运功率的关系。插图: 两束偏振激光对应的激光谱线

Fig. 3 Output power versus incident pump power for both π - and σ -polarization laser at 1.06 μm .

Insets are the laser spectra for both polarization laser beams

进一步采用分辨率为 0.05 nm 的光栅单色仪对不同偏振的激光输出波长进行测量, 结果如图 3 的插图所示。对于 π 和 σ 偏振激光输出, 中心波长分别为 1064.3 nm 和 1066.7 nm, 对应两个波长的线宽分别为 0.3 nm 和 0.4 nm。结果表明: 通过 PBS 主动选偏可实现 Nd:YVO₄ 晶体不同偏振对应不同波长的激光输出, 在双波长可选激光系统设计中具有重要应用。

3.2 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁的激光偏振选择

为研究 Nd:YVO₄ 晶体 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁对应 1.34 μm 波段的 π 和 σ 偏振激光输出特性, 更换 PBS 和两个腔镜。所使用的 PBS 镀对 1300~1500 nm 的增透膜, 对 1.34 μm 透射率为 8% 的耦合输出镜, 实现了 π 和 σ 偏振激光输出。图 4 给出了 1.34 μm 波段 π 和 σ 偏振激光输出功率与入射抽运功率的关系。由图 4 可知, 在 11 W 的入射抽运功率下, ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁在 1.34 μm 波段 π 和 σ 偏振激光分别获得了 2.9 W 和 1.6 W 的输出功率, 对应的波长均在 1341.8 nm, 线宽分别为 0.3 nm 和 0.4 nm。表明两个偏振在增益上差异较大, 但输出波长相同。

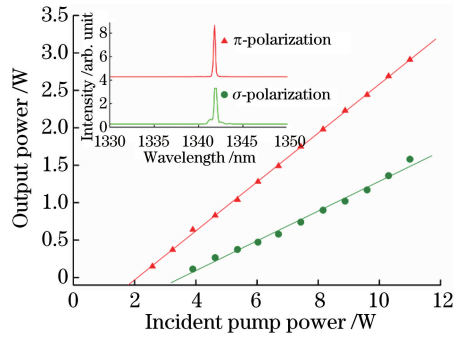


图 4 1.34 μm 波段 π 和 σ 偏振激光输出功率与入射抽运功率的关系。插图: 两束偏振激光对应的激光谱线

Fig. 4 Output power versus incident pump power for both π - and σ -polarization laser at 1.34 μm .

Insets are the laser spectra for both polarization laser beams

4 结 论

本文利用 PBS 主动选择特定偏振的激光进行振荡, 分别对 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体的 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 和 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁的偏振激光性能进行研究。四方晶系 Nd:YVO₄ 偏振荧光光谱的差异, 导致了输出 π 和 σ 偏振激光的性能差异。实验中利用 PBS 反射光束对 s 偏振分量反射率高的优势进行主动选偏, 结合 a 切 Nd:YVO₄ 晶体沿通光方向旋转, 分别实现 π 和 σ 偏振激光的输出。在 11 W 的入射抽运功率下, 基于 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 能级跃迁分别获得了 5.5 W 的 π 偏振 1064.3 nm 激光和 4.4 W 的 σ 偏振 1066.7 nm 激光输出; 基于 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 能级跃迁分别获得了 2.9 W 的 π 偏振激光和 1.6 W 的 σ 偏振激光输出, 而波长均为 1341.8 nm。结果表明: a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体的 π 偏振激光有更高的转换效率, σ 偏振激光有更长的激光谱线。利用 PBS 选偏, 结合各向异性激光晶体偏振光谱上的差异, 选择性地实现了特定偏振的激光输出, 对丰富 Nd:YVO₄ 晶体激光波长和实现激光的特殊应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 54-56.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 54-56.
- [2] Duan Y M, Zhu H Y, Ye Y L, *et al.* Efficient RTP-based OPO intracavity pumped by an acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1314-1317.
- [3] Dai Rong, Hu Miao, Cai Meiling, *et al.* Experimental study of thermally induced frequency difference tuning of Nd:YVO₄ microchip dual frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(1): 0101003.
戴荣, 胡森, 蔡美伶, 等. Nd:YVO₄ 双频微片激光器的热致频差调谐实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101003.
- [4] Yao Jianquan, Xu Degang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 58-62.
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 58-62.
- [5] Wang X Z, Wang Z F, Bu Y K, *et al.* A 1064 nm, 1085 nm dual-wavelength Nd:YVO₄ laser using Fabry-Perot filters as output couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(19): 1983-1985.
- [6] Chen Y F, Efficient subnanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ self-stimulated Raman laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(11): 1251-1253.
- [7] Yu H H, Liu J H, Zhang H J, *et al.* Advances in vanadate laser crystals at a lasing wavelength of 1 micrometer[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(6): 847-864.
- [8] Wang Changqing, Chow Y T, Meng Xianlin, *et al.* Fluorescence spectra and laser characteristics of Nd:YVO₄ crystal excited by the polarized emission from a laser diode[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(12): 1129-1132.
王长青, Chow Y T, 孟宪林, 等. Nd:YVO₄ 晶体的偏振激发荧光光谱及其 LD 泵浦激光特性[J]. 中国激光, 1998, 25(12): 1129-1132.

- [9] Wu B, Jiang P, Yang D Z, *et al.* Compact dual-wavelength Nd:GdVO₄ laser working at 1063 and 1065 nm[J]. *Optics Express*, 2009, 17(8): 6004-6009.
- [10] Lü Y F, Xia J, Fu X H, *et al.* Diode-pumped orthogonally polarized Nd:LuVO₄ lasers based on the ⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2} transition[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(4): 898-903.
- [11] Ouyang Xiaojun, Wei Yong, Zhang Ge, *et al.* Single wavelength 1339 nm Nd:YAP pulse laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 50-53.
欧阳小军, 魏 勇, 张 戈, 等. 1339 nm 单一谱线 Nd:YAP 脉冲激光器[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 50-53.
- [12] Duan Y M, Liao X Q, Xu C W, *et al.* Selection of π - and σ -polarization laser emission in Nd:Lu_{0.5}Y_{0.5}VO₄ mixed crystal[J]. *Mater Lett*, 2016, 183: 23-25.